Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 1, Mar.-Apr. 2024, p. 127-142

Evaluation of the Effects of Replacing Struvite with Triple Superphosphate Fertilizer on Some Physiological Indices and Phosphorus Availability in Wheat

T. Nazari [1], M. Barani Motlagh [2*], S.O. Rastegar[3], M.H. Sedri[4]

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mbarani@gau.ac.ir)
3- Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
4- Associate Professor, Soil and Water Research Department, Kurdistan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sanandaj, Iran

Received: 05-12-2023 Revised: 15-01-2024 Accepted: 16-01-2024 Available Online: 16-01-2024	**How to cite this article:** Nazari, T., Barani Motlagh, M., Rastegar, S.O., & Sedri, M.H. (2024). Evaluation of the effects of replacing struvite with triple superphosphate fertilizer on some physiological and phosphorus availability in wheat. *Journal of Water and Soil*, *38*(1), 127-142. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85725.1362

Introduction

Phosphorus is an essential element for all living organisms, and it cannot be replaced by any other element. Phosphorus has however a limited resource, and it is estimated that the extracted phosphorus resources (Apatite) will last for another 50 to 100 years. One of the most widely used technologies for recycling phosphorus is the precipitation of phosphorus from sewage sludge and leachate. Phosphorus Recovery as struvite ($NH_4MgPO_4.6H_2O$) from sewage sludge has attracted special attention due to its potential for use as an ecological and slow release fertilizer. Struvite is a white, grain-like solid, odor-free and sludge–free ingredient, composed of magnesium, ammonium and phosphate at equal molar concentrations. Therefore, this study is designed to examine the effect of struvite replacement with triple superphosphate fertilizer on some physiological parameters and phosphorus availability in wheat plants in calcareous soils deficient in phosphorus.

Methods and Materials

Soil with phosphorus deficiency was collected from 0-30 cm depth under arable lands of Hajjiabad-e Seyyedeh located in Ghorveh township, Kurdistan Province, Iran. The soil was air-dried and ground to pass through a 2-mm sieve, followed by laboratory analysis to determine its physico-chemical properties. The struvite used in the research was obtained by optimizing the three main factors of sulfuric acid concentration, solid-to-liquid ratio, and time for the leaching process, and the three key factors of Mg:P ratio, N:P ratio and pH for the precipitation process by Response Surface Methodology. To achieve the aim of this study a factorial experiment was carried based on completely randomized design with 4 replications. The factors included the application of different proportions of struvite replaced with triple superphosphate (S0:P0, S0:P100, S25:P75, S50:P50, S75:P25 and S100:P0) and 3 levels of phosphorus (50, 100 and 150 kg TSP ha^{-1}) and a total of 54 pots. The application rate for struvite was calculated based on total phosphorus (P_2O_5). Then 10 wheat seeds were planted in each pot at 2-cm depth which after plant emerging and greening, declined to 4 plants in each pot. The pots were randomly moved twice a week

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85725.1362

during the growth period to eliminate environmental effects. Irrigation and weeding operations were applied by hand. Plants were harvested 60 days after planting (beginning of flowering), washed with distilled water and dried with tissue paper. The samples were air-dried and then oven dried at 70˚C to a constant weight in a forced air-driven oven. Phosphorus concentrations in plant extracts were measured by the molybdenum vanadate or yellow method and chlorophyll content (a, b and ab) and carotenoids using the Arnon method. The statistical results of the data were analyzed using SAS software and LSD test (at 5% level) was used for comparing the mean values.

Results and Discussion

Based on the obtained results, all the investigated treatments and their interactions were significant at $p<0.01$. However, the interaction effect of fresh weight shoots and height was significant at $p<0.05$. The comparison of the average data showed that the highest amount of fresh weight shoots (7.79 g pot^{-1}), dry weight shoots (1.130 g pot^{-1}) and height (29.66 cm) was obtained from the application of S75:P25 150 kgTSP ha^{-1}. By use of struvite instead of triple superphosphate fertilizer, the phosphorus concentration and uptake of wheat increased at all three fertilizer levels, so that the highest phosphorus concentration (0.174%) was obtained from S75:P25 150 kg TSP ha^{-1}. However, there was no statistically significant difference for S100:P0 (0.169%) treatment. The highest amount of phosphorus uptake in wheat with an average of 0.197 g pot^{-1} was obtained from the S75:P25 treatment (150 kg TSP ha^{-1}), compared to the treatment of 100% struvite (S100:P0) and 100% triple superphosphate fertilizer (S0:P100) with the averages of 0.158 and 0.109 g pot^{-1}, respectively, showing 19.79 and 44.67 percent increase. Also, the results showed that the treatment of 150 kg TSP ha^{-1} 100% struvite (S100:P0) compared to 100% triple superphosphate fertilizer (S0:P100) increased the amounts of chlorophyll a, b, ab and carotenoids by 7.78, 3.82, 6.44 and 6.84 percent, respectively.

Conclusion

Despite struvite's low solubility, it is a highly soluble phosphorus fertilizer for plants . However, the reasons for this apparent contradiction and also the specific mechanisms of struvite dissolution are still unclear. Hence, further accurate measurements at different pH and EC conditions with different physical and chemical properties of soil studying phosphorus fractionation in soil will help to better understand the use of struvite. Therefore, it is recommended to optimize the timing and application rate of struvite in relation to the demand for different agricultural and garden crops.

Keywords: Chlorophyll, Phosphorus, Struvite, Wheat

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۳، ص. ۱۴۲-۱۲۷

ارزیابی تأثیر جایگزینی استرووایت با کود سوپر فسفات تریپل بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی و فراهمی فسفر در گیاه گندم

طالب نظری[۱]- مجتبی بارانی مطلق[۲*]- سید امید رستگار[۳]- محمد حسین سدری[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۶

چکیده

استرووایت (فسفات آمونیوم منیزیم) یک ماده معدنی با حلالیت کم در آب است که به‌طور افزاینده‌ی از تصفیه خانه‌های فاضلاب بازیابی می‌شود. هدف از این پژوهش بررسی اثر استرووایت جایگزین شده با کود سوپر فسفات تریپل بر شاخص‌های فیزیولوژیکی و فراهمی فسفر در گیاه گندم بود. بدین منظور آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار به‌صورت گلدانی به مدت ۱۰ هفته به اجرا درآمد. فاکتورها شامل کاربرد نسبت‌های مختلف کود استرووایت جایگزین شده با سوپر فسفات تریپل (S0:P0، S0:P100، S25:P75، S50:P50، S75:P25 و S100:P0) و ۳ سطح فسفر (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار) بود. میزان کاربرد استرووایت براساس مقدار فسفر کل (P_2O_5) سوپر فسفات تریپل محاسبه شد. بر پایه نتایج بدست آمده نوع تیمار کودی و سطوح مصرف و اثر متقابل آنها بر تمامی تیمارهای مورد بررسی بجز وزن تر و ارتفاع، در سطح احتمال یک درصد ($p < 0.01$) معنی‌دار شد. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیشترین مقدار وزن تر اندام‌هوایی ۷/۷۹ گرم در گلدان، وزن خشک اندام هوایی ۱/۱۳۰ گرم در گلدان ، ارتفاع ۲۹/۶۶ سانتی‌متر و غلظت فسفر اندام هوایی ۰/۱۷۴ درصد از کاربرد تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد S100:P0 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار در مقایسه با S0:P100 می‌تواند مقادیر کلروفیلa، b، کل و کارتنوئید را به‌ترتیب به‌میزان ۷/۷۸، ۳/۸۲، ۶/۴۴ و ۶/۸۴ درصد افزایش دهد. با وجود حلالیت کم استرووایت (۳ تا ۵ درصد) به اندازه کود فسفر رایج، برای گیاهان زراعی مؤثر است. بنابراین توصیه می‌شود زمان‌بندی و نرخ کاربرد استرووایت در رابطه با تقاضای محصولات زراعی و باغی مختلف بهینه شود.

واژه‌های کلیدی: استرووایت، سوپر فسفات تریپل، فسفر، کلروفیل، گندم

مقدمه

فسفر (P) از عناصر ضروری و پرمصرف برای رشد و نمو، ذخیره و انتقال انرژی در گیاهان به شمار می‌رود. این عنصر جزء ترکیبات ساختمانی سلول‌ها و بسیاری از ترکیبات شیمیایی است و بعد از نیتروژن، فسفر دومین عنصر غذایی است که کمبود آن محدود کنندهٔ رشد گیاهان است (Hopkins & Ellsworth., 2003). فسفر عنصری حیاتی برای همه موجودات زنده است و با عناصر دیگر قابل جایگزینی نیست (Seyhan, 2009). با این حال، فسفر یک منبع محدود است و تخمین زده می‌شود که منابع فسفر قابل استخراج (آپاتیت) فقط ۵۰ تا ۱۰۰ سال دیگر دوام داشته باشند (Liu *et al*., 2007). امروزه به علت هزینه‌های سنگین کودهای شیمیایی، لازم است که جذب و مصرف

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mbarani@gau.ac.ir)
۳- دانشیار گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۴- دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، سنندج، ایران
https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85725.1362

عناصر غذایی از کارآیی بالایی برخوردار باشند تا بدین‌وسیله از هزینه های تولید کاسته و سود بیشتری برای کشاورزان داشته باشد. اخیرا استفاده از کودهای کندرها، موجب آزادسازی کنترل شده مواد غذایی مورد نیاز گیاه شده است. به گونه‌ای که از یک سو کارایی و اثر بخشی آنها بر روی محصول حداکثر و از سوی دیگر اثرات منفی ناشی از استفاده مقادیر بالای کود به حداقل برسد. به همین دلیل کودهای کندرها را می‌توان به‌عنوان کودهای نسبتاً ایده‌آل در نظر گرفت (Fageria, 2014). بنابراین، ایجاد یک روش پایدار برای بازیافت و استخراج فسفر از باقی مانده‌های غنی از فسفر از اهمیت زیادی برخوردار است (Xu *et al.*, 2012). درحال حاضر، یکی از پرکاربردترین فن آوری‌ها برای بازیافت فسفر، رسوب مواد معدنی فسفر از لجن فاضلاب و شیرابه‌ها است. مواد معدنی فسفر را می‌توان به‌صورت استرووویت[1]، هیدروکسی آپاتیت یا کلسیم فسفات رسوب داد (Yuan *et al.*, 2012). بازیابی فسفر به‌عنوان استرووویت ($NH_4MgPO_4.6H_2O$) از خاکستر لجن فاضلاب در دهه گذشته به‌دلیل پتانسیل استفاده به‌عنوان کود اکولوژیکی توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است (Militaru *et al.*, 2019). استرووویت (فسفات آمونیوم منیزیم) یک ماده جامد بلوری سفید، دانه‌ای، بدون بو و عاری از لجن است که از منیزیم، آمونیوم و فسفر در غلظت‌های مولی برابر تشکیل شده است (El Rafie *et al.*, 2013). از نظر جرم، استرووویت از ۴۴٪ آب کریستال، ۳۹٪ فسفات، ۱۰٪ منیزیم و ۷٪ آمونیوم تشکیل شده است (Gell *et al.*, 2011). واکنش کلی رسوب استرووویت براساس واکنش شیمیایی بین یون‌های منیزیم، فسفات و آمونیوم در زیر نشان داده شده است (Hertzberger *et al.*, 2020).

$$HPO_4^{2-} + NH_4^{+} + Mg^{2+} + OH^{-} + 5H_2O \rightarrow NH_4MgPO_4.6H_2O \downarrow$$

اکثر مطالعات نشان می‌دهند که کارایی زراعی رسوب استرووویت مشابه کودهای فسفره مشتق شده از سنگ فسفات است (Huygens *et al.*, 2019). محققان متعددی گزارش کردند که استرووویت دارای عناصر غذایی ضروری (فسفر و نیتروژن) برای رشد گیاه هست که می‌توان از آن به‌عنوان کود در کشاورزی استفاده کرد (Li *et al.*, 2019; Mancho *et al.*, 2023) علاوه بر این حلالیت کم استرووویت (۳ تا ۵ درصد) سبب رها شدن آهسته فسفر، نیتروژن و منیزیم در خاک شده که این امر افزون بر اینکه امکان رشد بهینه گیاه را در طول زمان فراهم می‌کند، مانع از بروز پدیده‌های زیان بار ناشی از مصرف بیش از اندازه این عناصر در خاک می‌شود (Mancho *et al.*, 2023; Hall *et al.*, 2020). بخش آمونیاکی استرووویت شکل‌های نیترات را آزاد می‌کند که تأمین طولانی‌مدت مواد مغذی را تضمین می‌کند. این ویژگی اجازه می‌دهد تا کاربرد مستقیم و دوز بالای استرووویت، نسبت به کودهای معمولی برای گیاهان خطر کمتری داشته باشد (Mancho *et al.*, 2023). از طرفی نسبت نیتروژن به فسفر پایین در استرووویت سبب شده است که مقدار نیتروژن موجود در استرووویت برای رشد بهینه گیاه کافی نباشد. در بحث تغذیه، با توجه به این نکته که مقدار نیتروژن موجود در گیاهان به مراتب بیشتر از مقدار فسفر است. بنابراین تأمین نیتروژن خاک و گیاه با سایر منابع نیتروژنی راحت‌تر است و از استرووویت به‌عنوان کود فسفر استفاده می‌شود (Mancho *et al.*, 2023; Hertzberger *et al.*, 2020). مواد غذایی موجود در استرووویت با سرعت کمتری در مقایسه با دیگر کودها آزاد می‌شود و ناخالصی‌های موجود بسته به منشا تولید استرووویت می‌تواند دو تا سه برابر کمتر از سایر کودهای تجاری است. علاوه بر این همزمان دارای عناصر غذایی فسفر، نیتروژن و منیزیم می‌باشد (Barbosa *et al.*, 2016). وجود منیزیم همچنین استرووویت را به کودی کارآمد برای گیاهان علفی تبدیل می‌کند زیرا منیزیم عنصر اساسی کلروفیل است (Muhmood *et al.*, 2019). ژل و همکاران (Gell *et al.*, 2011) گزارش کردند که کود استرووویت به اندازه سایر کودهای شیمیایی در بهبود رشد و نمو محصولات مختلف مؤثر است. همچنین پونس و همکاران (Ponce *et al.*, 2009) گزارش کردند میزان عملکرد و جذب فسفر در گیاه کاهو با استفاده از استرووویت مشتق شده از لجن بیشتر از کاربرد سوپر فسفات ساده است. آنان نتایج بهتر حاصل از استفاده از استرووویت را به محتوای بالا منیزیم و اثر هم افزایی بر جذب فسفر نسبت دادند. نتایج حاصل از پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد استرووویت بازیافت شده از انواع مواد آلی زائد (لجن فاضلاب شهری، ادرار منابع انسانی و شیرابه‌ها) باعث افزایش رشد کاهو (Wen *et al.*, 2019)، ذرت (Nongqwenga *et al.*, 2017)،کلم چینی (Ryu *et al.*, 2017)، جو (Bastida *et al.*, 2019) و گیاه گندم در خاک لوم شنی با pH=6 (Talboys *et al.*, 2016) می‌شود. گندم (*Triticum aestivum* L.) از مهمترین گیاهان زراعی در ایران و تأمین کننده بخش قابل توجه پروتئین و انرژی مردم دنیاست (Arzani & Ashraf, 2017). با این حال، تقاضا برای گندم به‌دلیل افزایش سریع جمعیت همچنان در حال افزایش است. براساس پیش‌بینی‌های سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO) تا سال ۲۰۵۰ سالانه حدود۸۴۰ میلیون تن گندم مورد نیاز خواهد بود. با این حال، تولید گندم با افزایش تغییرات آب و هوای جهانی در سال‌های اخیر با چالش‌های جدی مواجه شده است (Ma *et al.*, 2022). لذا این پژوهش با هدف بررسی تأثیر استرووویت حاصل از لجن فاضلاب شهری به‌عنوان کود فسفر بر برخی خصوصیات فیزیولوژیک و فراهمی فسفر در گیاه گندم در مقایسه با سوپر فسفات تریپل انجام گرفت.

1- Struvite

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک و تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن

به‌منظور بررسی اثر رسوب استرووویت بر فراهمی فسفر برای گیاه گندم، تعدادی نمونه خاک از مناطق مختلف استان کردستان انتخاب و پس از تعیین مقدار فسفر قابل استفاده با روش اولسن (Olsen *et al.*, 1954)، یک خاک آهکی که دارای مشکل کمبود فسفر (با مقدار فسفر ۲/۵۴ میلی‌گرم برکیلوگرم) انتخاب گردید. خاک منتخب مورد استفاده از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری منطقه حاجی آباد سیده قروه با مختصات جغرافیایی (N ″۳۶ ´۰۷ °۳۵) (E ″۱۳ ´۵۶ °۴۷) برداشت و پس از هوا خشک نمودن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برای مطالعات آزمایشگاهی به شرح ذیل مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی همانند بافت خاک به روش هیدرومتری (Day, 1995)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی در نسبت ۲:۱ خاک به آب، کربن آلی با استفاده از پتاسیم دی کرومات (Walkey & Black, 1934)، نیتروژن کل به روش کجلدال (Jones & Case, 1990)، پتاسیم قابل استفاده خاک با استفاده از استات آمونیوم (Page *et al.*, 1982) و مقادیر آهن، روی بعد از عصاره‌گیری خاک با DTPA به روش لیندزی و نورول (Lindsay & Norvell, 1978) به‌وسیله دستگاه جذب اتمی تعیین گردید (جدول ۱).

آماده‌سازی گلدان‌ها و اعمال کودهای مورد نیاز:

نمونه‌های خاک، هواخشک، کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند و در هر گلدان پنج کیلوگرم خاک خشک ریخته شد. کود سوپرفسفات تریپل از مرکز آموزش، تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان کردستان و استرووویت مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از روش پاسخگویی سطح[1] و طراحی مرکب مرکزی[2] در نرم افزار دیزاین اکسپرت[3] بهینه‌سازی شد. برای تولید استرووویت ابتدا لجن فاضلاب خام به مدت ۲۴ ساعت تحت دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و سپس خرد و آنگاه از الک ۱۰ مش ($<$ 2mm) عبور داده شد. سپس در محدوده دمایی ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲ ساعت در یک کوره الکتریکی سوزانده و در دمای اتاق خنک شد (Xu *et al.*, 2012; Franz, 2008). از روش سطح پاسخ برای بررسی تأثیر سه فاکتور اصلی غلظت اسید سولفوریک (۰/۰۲ تا ۰/۸ مول بر لیتر)، نسبت جامد به مایع (۲۰ تا ۱۵۰ میلی‌لیتر برگرم) و زمان (۰/۵ تا ۴ ساعت) برای استخراج فسفر از لجن فاضلاب (Meng *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2012; Franz, 2008) و برای بازیابی آن به صورت استرووویت تأثیر سه فاکتور نسبت N/P (۱ تا ۲) نسبت Mg/P (۱ تا ۲) و pH (۸ تا ۱۱) بهینه‌سازی شد (Xu *et al.*, 2012; Zin & Kim, 2019). لازم به ذکر است که برای جداسازی فلزات سنگین از محلول حاصل از فرآیند لیچینگ از رزین تبادلی (AG 50W-X8) و برای رسوب کریستال استرووویت از کلرید منیزیم ($MgCl_2.6H_2O$) و کلراید آمونیوم (NH_4Cl) به‌عنوان منبع منیزیم و آمونیوم استفاده شد (Xu *et al.*, 2012; Zin & Kim, 2019). نتایج نشان داد تحت شرایط بهینه، واکنش ۰/۵ مول بر لیتر اسید سولفوریک در نسبت جامد به مایع ۵۷ مول بر گرم به‌مدت ۲ ساعت ۹۹/۸ درصد فسفر قابل استخراج بود. همچنین بیشترین بازیابی فسفر به‌عنوان استرووویت درpH 8 نسبت Mg/Pو N/P به‌ترتیب ۲ و ۱ به‌دست آمد. آنالیز فیزیکو شیمیایی کود استرووویت در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به پودری بودن کود استرووویت و برای کاهش خطای آزمایش هر دو کود سوپر فسفات تریپل و استرووویت نیز از الک ۱۸ مش عبور داده شد (شکل ۱)، ۳ روز قبل از کشت به خاک گلدان‌ها اعمال گردید. براساس آزمون خاک و وزن خاک گلدان‌ها عناصر نیتروژن و پتاسیم با احتساب مقدار موجودشان در استرووویت، از منبع‌های اوره ($CO(NH_2)_2$) و سولفات‌پتاسیم (K_2SO_4) تأمین شد.

آزمایش گلدانی

در این پژوهش، برای غلبه بر کمبود احتمالی فسفر در اوایل فصل رشد گیاه، از نسبت‌های مختلف استرووویت (S) با کودهای تجاری فسفر (P) شامل ۱۰۰ به صفر (S100:P0)، ۷۵ به ۲۵ (S75:P25)، ۵۰ به۵۰ (S50:P50)، ۲۵ به ۷۵ (S25:P75) ۱۰۰ به صفر (S0:P100) استفاده شد (Hertzberger *et al.*, 2021). میزان کاربرد استرووویت بر اساس مقدار فسفر کل (P_2O_5) سوپر فسفات تریپل محاسبه شد (Ehmann *et al.*, 2017). بدین منظور آزمایش گلدانی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با کاربرد ۶ نوع کود (S0:P0، S0:P100، S25:P75، S50:P50، S75:P25 و S100:P0) و ۳ سطح فسفر (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار) و کشت گیاه گندم در ۳ تکرار اجرا گردید. سپس تعداد ۱۰ عدد بذر گندم در هر گلدان کشت گردید که پس از دو هفته به ۴ عدد تقلیل یافت. جهت حذف اثرات محیطی در طول دوره رشد، جای گلدان‌ها به‌صورت تصادفی تغییر داده شد. عملیات آبیاری (آب مقطر) و وجین علف‌های هرز با دست انجام گرفت. رطوبت خاک گلدان‌ها در طول دوره رشد گیاه در حدود ظرفیت مزرعه بطور وزنی تأمین شد.

1- Response Surface Methodology
2- Central composite design
3- Expert Design

اندازه‌گیری پارامترهای مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه گندم

پس از گذشت ۱۰ هفته (شروع گلدهی)، گیاهان به‌صورت کف‌بر برداشت شده و ارتفاع آنها اندازگیری شد. اندام هوایی با آب شهری سپس با آب مقطر شسته شده و بر روی توری‌های پلاستیکی پخش تا آب اضافی موجود در سطح آنها حذف شود سپس وزن خشک اندام هوایی پس از گذاردن نمونه‌ها در آون به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، تعیین گردید (Jones & Case., 1990). پس از آن غلظت فسفر در اندام هوایی با روش روش مولیبدات وانادات یا روش زرد (Kuo, 1996) و جذب کل فسفر از خاک هر گلدان (حاصل‌ضرب وزن ماده خشک در غلظت فسفر در گیاه) به‌عنوان پاسخ‌های گیاهی به کود استروویت در نظر گرفته خواهد شد. همچنین اندازه‌گیری کلروفیل ها و کاروتنوئید پس از استخراج با استون ۸۰٪ و با استفاده از روش آرنون (Arnon, 1949) در طول موج‌های ۴۸۰، ۵۱۰، ۶۴۵ و ۶۶۳ نانومتر انجام می‌شود. در نهایت مقدار کلروفیل و کارتنوئیدها برحسب میلی‌گرم در گرم بافت تر گیاه از طریق فرمول‌های زیر محاسبه شد:

$$= 12.7(663A) - 2.69(645A) * V/ W* 1000 \quad (۱)$$

غلظت کلروفیل a

$$22.9(645A) - 4.68(663A) \quad (۲)$$

غلظت کلروفیل b = * V/ W *1000

$$20.9(645A) - 8.02(663A) \quad (۳)$$

غلظت کلروفیل کل = * V/ W* 1000

$$= 7.6 (480A) – 1.49(510A) * V/ W* 1000 \quad (۴)$$

غلظت کارتنوئید

که در این فرمول‌ها A: جذب طول موج بر حسب نانومتر، W: وزن تر بافت برحسب گرم، و V: حجم نهایی کلروفیل و کارتنوئید در استون ۸۰ درصد می‌باشد (Arnon, 1949). تجزیه و تحلیل آماری مقایسه بین تیمارهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD (در سطح احتمال ۵ درصد) استفاده شد. همچنین برای ترسیم نمودارها از برنامه Excel 2016 استفاده شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش قبل از کاشت

Table 1- Some physico-chemical properties of soil tested before planting

بافت خاک Soil texture	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	کربن آلی OC(%)	نیتروژن کل N (%)	فسفر قابل استفاده P (mg kg^{-1})	پتاسیم قابل استفاده K (mg kg^{-1})	روی قابل استفاده Zn (mg kg^{-1})	آهن قابل استفاده Fe (mg kg^{-1})	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dSm^{-1})	پ هاش pH
لوم رسی Clay loam	32	37	31	0.58	0.06	2.54	260	1.24	8.28	0.372	7.18



شکل ۱- استروویت (فسفات آمونیوم منیزیم) بازیابی شده از خاکستر لجن فاضلاب (راست) وکود فسفر تجاری (سوپرفسفات تریپل) (چپ)

Figure 1- Recovered struvite from sewage sludge ash (magnesium ammonium phosphate) (right) and commercial phosphorus fertilizer (triple superphosphate) (left)

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی استرووویت مورد استفاده در پژوهش
Table 2- Some physico-chemical properties of struvite used in this study

خصوصیات Parameters	استرووویت Struvite	سوپر فسفات تریپل TSP	خصوصیات Parameters	استرووویت Struvite	سوپر فسفات تریپل TSP
فرمول شیمیایی Chemical formula	$NH_4MgPO_4.6H_2O$	$Ca(H_2PO_4)_2.2H_2O$	فرمول شیمیایی Chemical formula	$NH_4MgPO_4.6H_2O$	$Ca(H_2PO_4)_2.2H_2O$
فسفر محلول در آب Water soluble P_2O_5 (%)	12.46	>39	آرسنیک As (mg kg^{-1})	10.9	<50
فسفر محلول در سیترات Citrate-soluble P_2O_5 (%)	15.25	20-30	کادمیم Cd (mg kg^{-1})	0.28	<25
فسفر غیر محلول در سیترات Citrate-soluble P_2O_5 (%)	2.25	30-40	سرب Pb (mg kg^{-1})	3	<50
فسفر کل Total P_2O_5 (%)	29.97	46	آهن Fe (mg kg^{-1})	1250	-
اکسید منیزیم MgO (%)	16.40	-	روی Zn (mg kg^{-1})	605	-
اکسید کلسیم CaO (%)	1.19	-	مس Cu (mg kg^{-1})	114	-
اکسید سدیم Na_2O (%)	0.80	-	منگنز Mn (mg kg^{-1})	310	-
پتاسیم اکسید K_2O (%)	0.10	-	نیکل Ni (mg kg^{-1})	55	-
اکسید آلومینیوم Al_2O_3 (%)	0.99	-	کروم Cr (mg kg^{-1})	43	-

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های مهم استرووویت بازیابی شده از خاکستر لجن فاضلاب شهری سنندج در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به مقادیر جرم مولی استرووویت تئوری (۲۴۵/۴۰) و جرم مولی نیتروژن (۱۴)، فسفر (۳۰/۱) و منیزیم (۲۴/۳۰)، کود استرووویت تئوری با نسبت مولی ۱:۱:۱ و محتوایی استرووویت ۱۰۰ درصد دارای مقادیر ۱۲/۶ درصد فسفر، ۵/۷ درصد نیتروژن و ۹/۹ درصد منیزیم است (Zin & Kim, 2019). با توجه به مقادیر استرووویت تئوری و مقادیر موجود در جدول ۲، استرووویت مورد استفاده در این پژوهش دارای ۱۳/۱ درصد فسفر خالص، ۵/۴ درصد نیتروژن و ۱۰/۳ درصد منیزیم با نسبت مولی P: N: Mg ۱/۲ :۱/۰:۰/۹ و محتویی استرووویت ۹۴/۶ درصد بوده که تقریبا مشابه با مقدار تئوری آن است (Zin & Kim, 2019). همچنین نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که گرید کودی استرووویت مورد استفاده در این پژوهش (۰/۱۰-۲۹/۹۷-۵/۷) و کود سوپرفسفات تریپل برابر با مقادیر (۰-۴۶-۰) بود (جدول ۲).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن است که نوع تیمار کودی ($p<۰/۰۱$) و سطوح مصرف استرووویت ($p<۰/۰۱$) و اثر متقابل آنها بر وزن‌تر اندام هوایی گیاه گندم در سطح احتمال پنج درصد ($p<۰/۰۵$) معنی‌دار شد (جدول ۳). همچنین نتایج تجزیه واریانس جدول ۳ نشان داد که نوع و سطوح تیمار کودی استرووویت و اثر متقابل آنها بر وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد ($p<۰/۰۱$) معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر متقابل نوع تیمار کودی و سطوح مختلف استرووویت بر وزن تازه اندام هوایی گیاه (جدول ۴) نشان داد که بیشترین مقدار وزن تازه اندام هوایی با میانگین ۷/۷۹ گرم در گلدان از تیمار S75:P25 ۱۵۰کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند نسبت به تیمار S100:P0 کود استرووویت با میانگین ۷/۳۱ گرم در گلدان سطح ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت و کمترین مقدار آن با میانگین ۳/۲۵ گرم در گلدان مربوط تیمار شاهد سطح ۵۰ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). همچنین بیشترین مقدار وزن خشک اندام هوایی گیاه گندم با میانگین ۱/۱۳۰ گرم در گلدان از تیمار S75:P25 ۱۵۰کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار S75:P25 ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به‌ترتیب افزایشی معادل ۳۵/۶۶ و ۴۵/۲۲ داشت (جدول ۴). در همین راستا هرتزبرگر و همکاران (Hertzberger *et al.*, 2021) در بررسی واکنش ذرت و سویا به کوددهی فسفر با ترکیبی مخلوط از کود مونو آمونیوم فسفات و استرووویت با نسبت‌های مختلف

(S0:M100، S25:M75، S50:M50، S75:M25 و S100:M0) گزارش کردند که زیست‌توده کل گیاه ذرت تا ۵۰ درصد جایگزینی کود مونو فسفات آمونیوم توسط استروویت و زیست‌توده کل گیاه سویا تا ۲۵ درصد جایگزینی کود مونو آمونیوم فسفات توسط استروویت از لحاظ مقدار مشابه بود. آنان حساسیت کمتر گیاه ذرت به جایگزینی کود مونو آمونیوم فسفات توسط کود استروویت را داشتن ۵۲ درصد زیست‌توده ریشه و ۲۲ درصد طول ریشه بیشتر نسبت به گیاه سویا گزارش کردند (Hopkins & Hansen 2019). در شرایط کمبود عناصر غذایی، گیاهان زراعی مواد فتوسنتز تولیدی را برای استراتژی‌های جذب مواد مغذی مانند رشد ریشه و تولید ترشحات اسیدی اختصاص می‌دهند (Talboys *et al*., 2016). احتمالاً حل شدن استروویت از طریق ترشحات ریشه‌ای و اسیدی شدن ریزوسفر در گیاهانی که دارای زیست توده و طول ریشه کمتری هستند کمتر انجام می‌شود (Hertzberger *et al*., 2021). از طرفی، بین اسیدهای آلی (سیترات و اگزالات) تراوش شده توسط ریشه‌ها که می‌توانند انحلال استروویت را افزایش دهند، با سطح و زیست‌توده ریشه‌ها همبستگی مثبت و معنی‌دار وجود دارد (Eisenhauer *et al*., 2017; Guyonnet *et al*., 2018). اردال و همکاران (Eradal *et al*., 2023) در بررسی مقایسه اثر دو نوع استروویت (نوع ۱ و ۲ به‌ترتیب دارای ۷/۲۵ درصد و ۹/۸۵ درصد فسفر کل) و برخی کودهای تجاری (مونو آمونیوم فسفات، دی آمونیوم فسفات، سوپر فسفات تریپل و کود ۲۰-۲۰-۲۰) بر رشد گیاه کاهو در یک خاک آهکی گزارش کردند که تیمارهای مورد بررسی بر وزن تر کاهو در سطح یک درصد معنادار شد به گونه‌ای که بیشترین مقدار آن با میانگین ۱۴۵/۳ گرم در گیاه مربوط به استروویت نوع دو بود هر چند از لحاظ آماری با استروویت نوع یک و کود ۲۰-۲۰-۲۰ به‌ترتیب با میانگین ۱۴۰ و ۱۳۲/۳ گرم در گیاه اختلاف معنی‌داری نداشت و نسبت به کود دی آمونیوم فسفات با میانگین ۱۲۵/۳ گرم در گیاه، کود مونو آمونیوم فسفات با میانگین ۱۱۰/۷ گرم در گیاه و کود سوپرفسفات تریپل با میانگین ۷۳ گرم در گیاه به‌ترتیب افزایشی معادل با ۱۳/۷۶، ۲۳/۸۱ و ۴۵/۷۵ درصد داشت.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که نوع تیمار کودی (p<۰/۰۱) و سطوح مصرف استروویت (p<۰/۰۱) و اثر متقابل آنها بر ارتفاع گیاه گندم در سطح احتمال پنج درصد (p<۰/۰۵) معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مختلف استروویت نشان داد با جایگزین کردن استروویت به جای کود سوپر فسفات تریپل در هر سه سطوح کودی ارتفاع گیاه گندم افزایش یافت به‌نحوی‌که بیشترین ارتفاع گیاه با میانگین ۲۹/۶۶ سانتی‌متر از تیمار S75:P25 سطح ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار S75:P25 سطح کود ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار با میانگین ۲۵/۶۶ و ۲۵/۱۶ به‌ترتیب افزایشی معادل با ۱۳/۴۸ و ۱۵/۱۷ درصد داشت (جدول ۴).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر کاربرد سطوح مختلف استروویت بر برخی ویژگی‌های رشدی و زیست فراهمی فسفر در گیاه گندم

Table 3- Analysis of variance of the effect of different levels of Struvite on some of growth parameter and Phosphorus availability in wheat

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	ارتفاع Height plant	غلظت فسفر اندام هوایی Shoot P concentration	جذب فسفر اندام هوایی Shoot P uptake
سطوح کودی Fertilizer levels	2	9.39**	0.335**	20.72**	0.0029**	0.0159**
تیمارهای کودی Fertilizer treatments	5	10.35**	0.110**	20.38**	0.0043**	0.007**
تیمارها * سطوح کودی Fertilizer levels * treatments	10	0.778*	0.022**	2.69*	0.00020**	0.001**
خطا Error	36	0.358	0.0009	1.111	0.00001	0.00002
ضریب تغییرات C.V (%)		11.23	4.39	4.20	2.86	4.90

ns ، ** و * به‌ترتیب غیر معناداری و معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد می‌باشد.

ns, * and ** are non-significant, significant P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

همچنین کمترین مقدار آن با میانگین ۲۲/۱۶ سانتی‌متر از تیمار شاهد (S0:P0) سطح ۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد (شکل ۲). اردال و همکاران (Eradal *et al*., 2023) در بررسی مقایسه دو نوع استروویت (نوع ۱ و ۲ به‌ترتیب دارای ۷/۲۵ درصد و ۹/۸۵ درصد فسفر کل) و برخی کودهای تجاری فسفر این‌گونه بیان کردند که هم استروویت و هم کودهای تجاری فسفر نسبت به تیمار شاهد موجب افزایش ارتفاع گیاه کاهو شدند. بیشترین مقدار ارتفاع کاهو با میانگین ۱۸/۲ سانتی‌متر مربوط به استروویت نوع یک و کمترین مقدار آن با میانگین ۱۴سانتی مربوط به کود سوپرفسفات تریپل بود.

مطابق با جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نوع تیمار و سطوح مختلف کودی استروویت و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار غلظت و جذب فسفر در اندام هوایی گیاه گندم در سطح یک درصد (P <۰/۰۱) معنی‌دارشد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد با جایگزین کردن استروویت به جای کود سوپر فسفات تریپل غلظت و جذب فسفر گیاه گندم در هر سه سطح کودی افزایش یافت به‌نحوه‌ی که بیشترین غلظت فسفر با میانگین ۰/۱۷۴ درصد از تیمار S75:P25 ۱۵۰کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمار S100:P0 با میانگین ۰/۱۶۹ درصد از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۴). بیشترین مقدار جذب فسفر در گیاه گندم با میانگین ۰/۱۹۷ گرم در گلدان از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد کود استروویت (S100:P0) و ۱۰۰ کود سوپرفسفات تریپل (S0:P100) با میانگین‌های ۰/۱۵۸ و ۰/۱۰۹ گرم در گلدان به‌ترتیب افزایشی معادل با ۱۹/۷۹ و ۴۴/۶۷ درصد داشت (جدول۴). با توجه به این نکته که خاک مورد استفاده در پژوهش از لحاظ کربن آلی (۰/۵۸ درصد) و فسفر اولسن خاک (۲/۵۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) فقیر بوده (جدول ۲)، لذا هر سه سطح کودی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار باعث افزایش مقدار غلظت و جذب فسفر در گیاه گندم شد (جدول ۴). در واقع می‌توان این‌گونه بیان کرد در سطح ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار زمانیکه کود استروویت به‌طور کامل جایگزین سوپر فسفات تریپل می‌شود جذب فسفر توسط گیاه گندم به‌ترتیب معادل با ۱۸/۶۰، ۲۲/۸۸ و ۳۱/۰۱ درصد افزایش می‌یابد (جدول ۴). تالبوی و همکاران (Talboy *et al*., 2016) در بررسی چگونگی انحلال و نقش استروویت به‌عنوان یک کود آهسته رهش گزارش کردند هنگامی که استروویت برای به حداکثر رساندن عملکرد محصول در نزدیکی ریشه های در حال رشد در خاک قرار می گیرد، تنها بخشی از دانه‌های استروویت به اندازه کافی حل می‌شود تا منبعی از فسفر را برای رشد اولیه فراهم کند، با این حال در آزمایش گلدانی ۹۰ روزه گیاه گندم بهاره (*T. aestivum*) جذب فسفر پس از کاربرد استروویت مشابه کاربرد سوپر فسفات تریپل بود. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد در ۳۶ روز، تنها ۹ درصد از استروویت مورد استفاده در پژوهش حل شده بود این در حالی است که ۲۶ درصد آن طی ۹۰ روز حل شده بود. ترکیب استروویت با کودهای فسفر محلول در آب، جذب زود هنگام فسفر موجود در کود فسفره محلول را با آزادسازی آهسته‌تر فسفر از استروویت کاهش داده و به‌طور بالقوه جذب فسفر در مراحل بعدی رشد را افزایش می‌دهند (Hertzberger *et al*., 2021). در همین راستا هرتزبرگر و همکاران (Hertzberger *et al*., 2021) در بررسی واکنش ذرت و سویا به کوددهی فسفر با ترکیبی مخلوط از کود مونو آمونیوم فسفات و استروویت با نسبت‌های مختلف (S0:M100، S25:M75، S50:M50، S75:M25 و S100:M0) گزارش کردند که مقدار جذب فسفر در گیاه ذرت زمانی که با کود ۱۰۰ درصد استروویت کوددهی شده باشد نسبت به زمانی که با ۱۰۰ درصد با مونو فسفات آمونیوم کوددهی شده است ۸ درصد کمتر است. آنها دلیل این امر را محدودیت رشد گیاه ذرت در اوایل فصل رشد به علت کمبود فسفر قابل دسترس در نسبت‌های بیشتر استروویت نسبت دادند. این در حالیست که اختلاف آماری معنی‌داری در جایگزینی کود استروویت با مونو آمونیوم فسفات در جذب فسفر برای گیاه سویا مشاهده نشد. جذب فسفر در گیاه سویا زمانی که S25:M75 و S50:M50 گیاه ۲۵ تا ۵۰ درصد کود استروویت دریافت کرده بود کمتر از ۱۰۰ درصد کود استروییت بود. همچنین بین ۱۰۰ درصد کود استروویت و ۱۰۰ درصد کود مونو آمونیوم فسفات اختلاف آماری معنی‌دار مشاهده نشد.

نتایج تجزیه واریانس داده‌های اثر نوع تیمار کودی و سطوح مختلف کود استروویت و اثر متقابل آن‌ها بر صفات فیزیولوژیکی گیاه گندم در سطح احتمال یک درصد (P<۰/۰۱) معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد که با افزایش سطوح مصرف و همچنین زمانی که استروویت جایگزین کود سوپر فسفات تریپل می‌شود مقدار کلروفیلa، b و کلروفیل کل افزایش می‌یابد (جدول ۶). بیشترین مقدار کلروفیل a با میانگین ۰/۷۶۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار S75:P25 ۱۵۰کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمار S100:P0، S50:P50، S25:P75 و S0:P100 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به‌ترتیب با مقادیر ۰/۷۵۸، ۰/۷۲۷، ۰/۷۰۶ و ۰/۶۹۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه و تیمارهای S100:P0، S75:P25 و S50:P50 ۱۰۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به‌ترتیب با مقادیر ۰/۷۳۷، ۰/۷۴۹ و ۰/۷۱۰ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۶).

جدول ٤- نتایج مقایسه میانگین تأثیر کاربرد سطوح مختلف استرووویت بر برخی ویژگی‌های رشدی و فراهمی فسفر در گیاه گندم

Table 4- Means comparison of the effect of different levels of Struvite on some of growth parameter and Phosphors availability in wheat

منابع Resources	تیمارها Treatments	وزن تر اندام هوایی Shoot fresh weight (g pot^{-1})	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight (g pot^{-1})	ارتفاع Height plant (cm)	غلظت فسفر اندام هوایی Shoot P concentration (%)	جذب فسفر اندام هوایی Shoot P uptake (%g pot^{-1})
	شاهد S0:P0	3.25^{g}	0.498^{k}	22.16^{h}	0.094^{h}	0.047^{n}
	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	4e^{g}	0.529^{k}	23.50^{efgh}	0.134^{ef}	0.070^{m}
	۲۵% استرووویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	4.82^{ef}	0.538^{i}	23.33^{efgh}	0.124^{g}	0.072^{lm}
۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 50 kg TSP ha^{-1}	۵۰% استرووویت +۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	5.18^{de}	0.582^{ij}	25^{cdef}	0.128^{fg}	0.074^{lm}
	۷۵% استرووویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	5.41^{de}	0.619^{hi}	25.16^{cde}	0.128^{fg}	0.079^{kl}
	۱۰۰ ٪ استرووویت S100:P0	5.43^{de}	0.635^{gh}	25.50^{cd}	0.135^{e}	0.086^{jk}
	شاهد S0:P0	3.48^{g}	0.498^{k}	23^{gh}	0.094^{h}	0.047^{n}
	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	5.27^{de}	0.672^{fg}	25^{cdef}	0.136^{e}	0.091^{ij}
	۲۵% استرووویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	5.50^{de}	0.679^{efg}	24.66^{defg}	0.144^{d}	0.091^{hi}
۱۰۰کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 100 kg TSP ha^{-1}	۵۰% استرووویت +۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	5.53^{de}	0.699^{def}	24.66^{defg}	0.144^{d}	0.101^{gh}
	۷۵% استرووویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	5.52^{de}	0.727^{de}	25.66^{cd}	0.154^{bc}	0.112^{ef}
	۱۰۰ ٪ استرووویت S100:P0	5.88^{cd}	0.744^{d}	26^{bcd}	0.159^{b}	0.118^{e}
	شاهد S0:P0	3.33^{g}	0.531^{jk}	22.66^{h}	0.094^{h}	0.050^{n}
	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	5.83^{cd}	0.718^{def}	24.83^{def}	0.152^{c}	0.109^{fg}
	۲۵% استرووویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	5.87^{cd}	0.846^{c}	26.66^{bc}	0.154^{bc}	0.130^{d}
۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 150 kg TSP ha^{-1}	۵۰% استرووویت +۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	6.53^{bc}	0.902^{b}	25.83^{cd}	0.155^{bc}	0.139^{c}
	۷۵% استرووویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	7.79^{a}	1.130^{a}	29.66^{a}	0.174^{a}	0.197^{a}
	۱۰۰ ٪ استرووویت S100:P0	7.31^{ab}	0.934^{b}	27.66^{b}	0.169^{a}	0.158^{b}

ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، به روش آزمون LSD تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Means followed with the same letters in each column are not significant at $p<0.05$ by LSD Test.



شکل ۲- تأثیر کاربرد سطح ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار استروویت بر ارتفاع گیاه گندم

Figure 2- The effect of surface application of 150 kg ha^{-1} of struvite on height of wheat plant

همچنین بیشترین مقدار کلروفیل b با میانگین ۰/۳۳۲ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد که نسبت به تیمار S75:P25 ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار با میانگین ۰/۲۸۳ و ۰/۲۳۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه به‌ترتیب افزایشی معادل با ۱۷/۳۱ و ۲۸/۳۱ درصد داشت (جدول ۶). کلروفیل یکی از عوامل کلیدی در تعیین شدت فتوسنتز و تولید ماده خشک گیاهی و عامل مهمی در کنترل سلامت سبزینگی برگ است (Hakim *et al*., 2018). کلروفیل a رنگدانه اولیه فتوسنتزی در گیاهان است و غلظت آن ۲ تا ۳ برابر بیشتر از کلروفیل b است. غلظت این ترکیبات اطلاعاتی در مورد بهره‌وری، بنیه گیاه و کیفیت محیطی فراهم می‌کنند. تفاوت در محتوای کلروفیل را می‌توان وجود ترکیبات متفاوت در کودهای فسفر مورد استفاده برای کوددهی گیاهان بیان کرد (Jama-Rodzeńska *et al*., 2022). جاما–رودزه نسکا و همکاران (Jama-Rodzenska *et al*., 2022) در بررسی اثر استروویت تجاری (*Phosgreen*) حاصل از ضایعات فاضلاب و کود سوپر فسفات بر صفات فیزیولوژیک و فراهمی عناصر در گیاه کاهو (*Lactuca sativa* L.) گزارش کردند که کوددهی فسفر تأثیر قابل توجهی و معنی‌داری بر محتوای کلروفیل a ‏(P<۰/۰۱)، b ‏(P<۰/۰۵) و کل (P<۰/۰۱) داشت به‌نحوی‌که سطح کلروفیل کل گیاه کاهو را در مقایسه با کود سوپر فسفات تقریباً دو برابر افزایش یافت. آنها دلیل افزایش کلروفیل را وجود عناصر نیتروژن و منیزیم در کنار فسفر در کود استروویت (*phosgreen*) دانستند. علاوه بر نیتروژن، منیزیم یکی از عناصر ضروری رشد گیاهان بوده و نقش اصلی آن شرکت در ساختمان کلروفیل است. حدود ۷۵ درصد از منیزیم برگ در سنتز پروتئین و ۲۰ تا ۲۵ درصد کل منیزیم در رنگدانه‌های کلروفیل است و به‌طور عمده به‌عنوان یک کوفاکتور در فعالیت یکسری از آنزیم‌های درگیر در مرحله تثبیت کربن فتوسنتز نقش دارد (Guo *et al*., 2016). منیزیم تأثیر مستقیمی بر رشد گیاه دارد و ممکن است جذب فسفر را افزایش دهد و در نتیجه از افزایش رشد گیاه از طریق اثر هم افزایی با فسفر حمایت کند (González-Ponce *et al*., 2009).

نتایج حاصل از مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد بیشترین مقدار کلروفیل کل نیز با میانگین ۱/۰۹ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار S75:P25 ۱۵۰کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمارهای S100:P0 و S50:P50 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به‌ترتیب با مقادیر ۱/۰۷ و ۱/۰۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه و تیمارهای S100:P0 و S75:P25 ۱۰۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار به‌ترتیب با مقادیر ۱/۰۳۲ و ۱/۰۳۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۶). همچنین بیشترین مقدار کارتنوئید با میانگین ۰/۲۹۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار S75:P25 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار بدست آمد هر چند با تیمارهای S100:P0 و S50:P50 ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار به‌ترتیب با مقادیر ۰/۲۹۲ و ۰/۲۹۱ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه اختلاف آماری معنی‌داری نداشت و نسبت به تیمار S75:P25 ۱۰۰ و ۵۰ کیلوگرم کود فسفر در هکتار با میانگین ۰/۲۸۳ و ۰/۲۳۸ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه به‌ترتیب افزایشی معادل با ۱۲/۵ و ۲۵/۶۷ درصد داشت (جدول ۶).

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس تأثیر کاربرد سطوح مختلف استرووویت بر صفات فیزیولوژیک گیاه گندم

Table 5- Analysis of variance of the effect of different levels of Struvite on the physiological traits of wheat

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square			
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیلb Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کارتنوئید Carotenoid
سطوح کودی Fertilizer levels	2	0.162**	0.024**	0.310**	0.016**
تیمارهای کودی Fertilizer treatments	5	0.123**	0.020**	0.241**	0.007**
تیمارها * سطوح کودی Fertilizer levels * treatments	10	0.010**	0.001**	0.016**	0.0008**
خطا Error	36	0.0018	0.0000	0.0016	0.0000
ضریب تغییرات C.V (%)		7.01	1.91	4.77	2.90

ns ، ** و * به‌ترتیب غیر معناداری و معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد می‌باشد.

ns, * and ** are non-significant, significant (P≤0.05) and (P≤0.01), respectively.

اگرچه استرووویت دارای حلالیت کمی در آب (۳ تا ۵ درصد) است (Achat *et al.*, 2014b). لیکن پژوهش‌های آزمایشگاهی انجام شده نشان می‌دهد که استرووویت به اندازه کود فسفری بسیار محلول، برای گیاهان مؤثر است. (Achat *et al.*, 2014a; Talboys *et al.*, 2016). با این حال، دلایل این دوگانگی ظاهری و مکانیسم‌های خاص انحلال استرووویت هنوز نامشخص است. حلالیت کم استرووویت در آب ممکن است بیانگر این امر باشد که آزادسازی فسفر برای رشد اولیه محصولات بسیار کم است، در همین راستا بونوین و همکاران (Bonvin *et al.*, 2015) نشان دادند که نرخ جذب فسفر از استرووویت مشتق شده از ادرار در طول یک دوره رشد ۳۰-۷۲ روزه توسط گیاه چمن (*ryegrass*) نسبتاً ثابت بود. تامین جذب فسفر در مراحل اولیه رشد برای رشد و استقرار گیاه و برای بهینه‌سازی عملکرد محصول حیاتی است. اگرچه استرووویت حلالیت کمی در آب دارد لیکن اثربخشی استرووویت‌ها بر مقادیر کلروفیل کل را می‌توان به محتوای مواد مغذی آنها نسبت داد (Ackerman *et al.*, 2013). بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی قبلی نشان داده‌اند که استرووویت همانند کود معدنی فسفر بسیار محلول به عنوان منبع فسفر برای گیاهان مؤثر هستند (Eradal *et al.*, 2023; Talboy *et al.*, 2016) . یکی از دلایل اثر بخشی و برتری استرووویت ها نسبت به بیشتر کودهای شیمیایی را می‌توان آزادسازی آهسته و کافی مواد مغذی آنها دانست (Eradal *et al.*, 2023; Talboy *et al.*, 2016). اگرچه حلالیت استرووویت کند است، اما برخی از گیاهان توانایی تولید برخی اسیدهای آلی را دارند که حلالیت استرووویت را از ریشه افزایش می‌دهند (Eradal *et al.*, 2023). گیاهانی مانند نخود (*Cicer arietinum*)، کلزا (*Brassica napus*)، باقلا (*Lupinus albus*) و کاهو (*Lactuca sativa* L.) دارای سیستم ریشه‌ای توسعه یافته‌اند که می‌توانند اسیدهای آلی مانند اگزالیک اسید، مالیک اسید و سیترات را به داخل ریزوسفر ریشه تراوش کنند و باعث انحلال استرووویت شوند (Eradal *et al.*, 2023; Talboy *et al.*, 2016). نتایج پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که گیاهان تیمار شده با استرووویت و کودهای مرکب نسبت به سایر تیمارها دارای طول ریشه کوتاه‌تری هستند که دلیل این امر را تلاش ریشه‌ها برای رسیدن و دسترسی به عناصر غذایی گزارش کرده‌اند (Eradal *et al.*, 2023; Vysotskaya *et al.*, 2016). اگرچه ریشه‌ها در شرایط استفاده از استرووویت و کودهای مرکب کوتاه‌تر هستند، وزن آنها نزدیک یا حتی برتر از سایر کودهای کارآمد است که این مسئله نشان می‌دهد که ساختار ریشه گیاهان رشد یافته در شرایط استفاده از استرووویت کوتاه‌تر اما متراکم‌تر است. اردال و همکاران (Eradal *et al.*, 2023) در بررسی مقایسه اثر دو نوع استرووویت (نوع ۱ و ۲ به‌ترتیب دارای ۷/۲۵ درصد و ۹/۸۵ درصد فسفر کل) و برخی کودهای تجاری (مونو آمونیوم فسفات، دی آمونیوم فسفات، سوپر فسفات تریپل و کود ۲۰-۲۰-۲۰) بر رشد گیاه کاهو در یک خاک آهکی گزارش کردند که تیمارهای مورد بررسی بر شاخص SPAD کاهو در سطح یک درصد معنادار شد به گونه‌ای که بیشترین مقدار آن با میانگین ۲۸/۹ واحد اسپد مربوط به استرووویت نوع یک بود هر چند از لحاظ آماری با استرووویت نوع دو و کود ۲۰-۲۰-۲۰ و دی آمونیوم فسفات از لحاظ آماری اختلاف معنی داری نداشت و کمترین مقدار آن با میانگین ۲۳ واحد اسپد مربوط به

تیمار شاهد (بدون استفاده فسفر) بود. جایگزینی جزئی یا کامل کود استروویت با کودهای تجاری فسفر دارای مزایای زیست‌محیطی فراوانی است علاوه بر بازیابی فسفر از شیرابه‌ها و لجن فاضلاب، باعث کاهش خطرات آبشویی فسفات‌ها در اثر مصرف کودهای تجاری می شود.

جدول ٦- نتایج مقایسه میانگین‌های اثر کاربرد سطوح مختلف استرووویت بر صفات فیزیولوژیک گیاه گندم

Table 6- Means comparison of the effect of different levels of Struvite on the physiological traits of wheat

منابع Resources	تیمار Treatment	کلروفیلa Chlorophyll a (mg g^{-1})	کلروفیلb Chlorophyll b (mg g^{-1})	کلروفیل کل Total Chlorophyll (mg g^{-1})	کارتنوئید Carotenoid (mg g^{-1})
	شاهد S0:P0	0.372^{e}	0.161^{k}	0.533^{f}	0.191^{kl}
	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	0.527^{d}	0.189^{j}	0.716^{e}	0.203^{jk}
	۲۵% استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	0.495^{d}	0.218^{i}	0.714^{e}	0.205^{j}
۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 50 kg TSP ha^{-1}	۵۰% استروویت +۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	0.473^{d}	0.223^{i}	0.697^{e}	0.218^{i}
	۷۵% استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	0.476^{d}	0.238^{h}	0.713^{e}	0.220^{i}
	۱۰۰ ٪ استروویت S100:P0	0.614^{c}	0.257^{g}	0.872^{d}	0.220^{i}
	شاهد S0:P0	0.373^{e}	0.159^{k}	0.532^{f}	0.177^{m}
	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	0.637^{bc}	0.274^{f}	0.911^{d}	0.232^{h}
	۲۵% استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	0.620^{c}	0.274^{f}	0.895^{d}	0.246^{g}
۱۰۰کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 100 kg TSP ha^{-1}	۵۰% استروویت +۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	0.710^{a}	0.275^{ef}	0.988^{c}	0.250^{fg}
	۷۵% استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	0.749^{a}	0.283^{e}	1.033^{abc}	0.259^{ef}
	۱۰۰ ٪ استروویت S100:P0	0.737^{a}	0.296^{d}	1.032^{abc}	0.265^{de}
	شاهد S0:P0	0.372^{e}	0.164^{k}	0.536^{f}	0.183^{lm}
	۱۰۰ درصد سوپرفسفات S0:P100	0.699^{ab}	0.302^{cd}	1.001^{c}	0.272^{cd}
	۲۵% استروویت + ۷۵٪ سوپر فسفات S25:P75	0.706^{ab}	0.304^{cd}	1.01^{bc}	0.282^{bc}
۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات در هکتار 150 kg TSP ha^{-1}	۵۰% استروویت +۵۰٪ سوپر فسفات S50:P50	0.727^{a}	0.310^{bc}	1.037^{abc}	0.291^{ab}
	۷۵% استروویت + ۲۵٪ سوپر فسفات S75:P25	0.766^{a}	0.332^{a}	1.09^{a}	0.296^{a}
	۱۰۰ ٪ استروویت S100:P0	0.758^{a}	0.314^{b}	1.07^{ab}	0.292^{ab}

ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، به روش آزمون LSD تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Means followed with the same letters in each column are not significant at $p<0.05$ by LSD Test.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد است با جایگزین کردن استرووویت به جای کود سوپر فسفات تریپل در هر سه سطوح کودی (۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) پارامترهای مورد بررسی افزایش یافت به نحوه ی که بیشترین مقدار کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید به‌ترتیب با میانگین ۰/۷۶۶، ۰/۳۳۲، ۱/۰۹ و ۰/۲۹۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار ۷۵ درصد استرووویت + ۲۵ درصد کود سوپرفسفات تریپل بدست آمد. نتایج همچنین نشان داد کاربرد تیمار ۱۰۰ درصد کود استرووویت نسبت به تیمار ۱۰۰ درصد سوپر فسفات تریپل به‌ترتیب باعث افزایش ۱۰/۰۵ و ۳۱/۰۱ درصدی در مقدار غلظت و جذب فسفر شد. این امر می‌تواند به‌دلیل هم افزایی عناصر موجود در کود استرووویت نسبت به کودهای تجاری باشد. با وجود حلالیت کم استرووویت به اندازه کود فسفر بسیار محلول، برای گیاهان مؤثر است. با این حال، دلایل این دوگانگی ظاهری و مکانیسم‌های خاص انحلال استرووویت هنوز نامشخص است. بنابراین اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر برای بسترهای با pH و EC مختلف، بررسی خواص فیزیکی و شیمیایی خاک و جزءبندی فسفر در خاک به درک بهتر استفاده از استرووویت کمک خواهد کرد. بنابراین توصیه می-شود منشاء استخراج استرووویت، زمان‌بندی و نرخ کاربرد در رابطه با تقاضای محصولات زراعی و باغی مختلف بهینه شود.

References

1. Achat, D.L., Daumer, M.L., Sperandio, M., Santellani, A.C., & Morel, C. (2014a). Solubility and mobility of phosphorus recycled from dairy effluents and pig manures in incubated soils with different characteristics. *Nutrient cycling in agroecosystems*, *99*, 1-15. https://doi.org/10.1007/s10705-014-9614-0
2. Achat, D.L., Sperandio, M., Daumer, M.L., Santellani, A.C., Prud'Homme, L., Akhtar, M., & Morel, C. (2014b). Plant-availability of phosphorus recycled from pig manures and dairy effluents as assessed by isotopic labeling techniques. *Geoderma*, *232*, 24-33. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.028
3. Ackerman, J.N., Zvomuya, F., Cicek, N., & Flaten, D. (2013). Evaluation of manure-derived struvite as a phosphorus source for canola. *Canadian Journal of Plant Science*, *93*(3), 419-424.
4. Arzani, A., & Ashraf, M. (2017). Cultivated ancient wheats (Triticum spp.): A potential source of health-beneficial food products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *16*(3), 477-488. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12262
5. Barbosa, S.G., Peixoto, L., Meulman, B., Alves, M.M., & Pereira, M.A. (2016). A design of experiments to assess phosphorous removal and crystal properties in struvite precipitation of source separated urine using different Mg sources. *Chemical Engineering Journal*, *298*, 146-153. https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.148
6. Bastida, F., Jehmlich, N., Martínez-Navarro, J., Bayona, V., García, C., & Moreno, J.L. (2019). The effects of struvite and sewage sludge on plant yield and the microbial community of a semiarid Mediterranean soil. *Geoderma*, *337*, 1051-1057. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.046
7. Bonvin, C., Etter, B., Udert, K.M., Frossard, E., Nanzer, S., Tamburini, F., & Oberson, A. (2015). Plant uptake of phosphorus and nitrogen recycled from synthetic source-separated urine. *Ambio*, *44*, 217-227. https://doi.org/10.1007/s13280-014-0616-6
8. Day, P.R. (1965). Particle fractionation and particle size analysis. Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, *Including Statistics of Measurement and Sampling*, *9*, 545-567.
9. Degryse, F., Baird, R., Da Silva, R.C., & McLaughlin, M.J. (2017). Dissolution rate and agronomic effectiveness of struvite fertilizers–effect of soil pH, granulation and base excess. *Plant and Soil*, *410*, 139-152.
10. Ehmann, A., Bach, I.M., Laopeamthong, S., Bilbao, J., & Lewandowski, I. (2017). Can phosphate salts recovered from manure replace conventional phosphate fertilizer? *Agriculture*, *7*(1), 1. https://doi.org/10.3390/agriculture7010001
11. Eisenhauer, N., Lanoue, A., Strecker, T., Scheu, S., Steinauer, K., Thakur, M.P., & Mommer, L. (2017). Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. *Scientific Reports*, *7*(1), 44641. https://doi.org/10.1038/srep44641
12. El-Rafie, S., Hawash, S., & Shalaby, M.S. (2013). Evaluation of struvite precipitated from chemical fertilizer industrial effluents. *Advances in Applied Science Research*, *4*(1), 113-123.
13. Erdal, İ., Mejri, R., Yaylaci, C., & Turkan, Ş.A. (2023). Comparison of the effectiveness of struvite and some commercial fertilizers on the growth of lettuce. *Bahçe*, *52*(2), 95-102. https://doi.org/10.53471/bahce.1316809
14. Fageria, N.K. (2014). *Nitrogen management in crop production*. New York: CRC Press. ISBN:978-1-4822-2283-8.
15. Franz, M. (2008). Phosphate fertilizer from sewage sludge ash (SSA). *Waste Management*, *28*(10), 1809–1818.
16. Gell, K., De Ruijter, F.J., Kuntke, P., De Graaff, M., & Smit, A.L. (2011). Safety and effectiveness of struvite from black water and urine as a phosphorus fertilizer. *Journal of Agricultural Science*, *3*(3), 67.
17. González-Ponce, R., López-de-Sá, E.G., & Plaza, C. (2009). Lettuce response to phosphorus fertilization with struvite recovered from municipal wastewater. *HortScience*, *44*(2), 426-430.

18. Guo, W., Nazim, H., Liang, Z., & Yang, D. (2016). Magnesium deficiency in plants: An urgent problem. *The Crop Journal*, *4*(2), 83-91.
19. Guyonnet, J.P., Cantarel, A.A., Simon, L., & Haichar, F.E.Z. (2018). Root exudation rate as functional trait involved in plant nutrient-use strategy classification. *Ecology and Evolution*, *8*(16), 8573-8581. https://doi.org/10.1002/ece3.4383
20. Hakim, A., Jaganath, S., Honnabyraiah, M.K., Kumar, S.M., Kumar, S.A., & Dayamani, K.J. (2018). Effect of biofertilizers and Auxin on total chlorophyll content of leaf and leaf area in pomegranate (*Punica granatum* L.) cuttings. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, *6*(1), 987-991.
21. Hall, R.L., Staal, L.B., Macintosh, K.A., McGrath, J.W., Bailey, J., Black, L., & Williams, P.N. (2020). Phosphorus speciation and fertiliser performance characteristics: A comparison of waste recovered struvites from global sources. *Geoderma*, *362*, 114096. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114096
22. Hertzberger, A.J., Cusick, R.D., & Margenot, A.J. (2020). A review and meta-analysis of the agricultural potential of struvite as a phosphorus fertilizer. *Soil Science Society of America Journal*, *84*(3), 653-671. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114096
23. Hertzberger, A.J., Cusick, R.D., & Margenot, A.J. (2021). Maize and soybean response to phosphorus fertilization with blends of struvite and monoammonium phosphate. *Plant and Soil*, *461*, 547-563. https://doi.org/10.1007/s11104-021-04830-2
24. Hopkins, B.G., & Hansen, N.C. (2019). Phosphorus management in high-yield systems. *Journal of Environmental Quality*, *48*(5), 1265-1280. https://doi.org/10.2134/jeq2019.03.0130
25. Hopkins, B., & Ellsworth, J. (2003, January). Phosphorus nutrition in potato production. In *Idaho Potato Conference* (pp. 22-23).
26. Huygens, D., Saveyn, H., Tonini, D., Eder, P., & Delgado Sancho, L. (2019). Technical proposals for selected new fertilising materials under the Fertilising Products Regulation (Regulation (EU) 2019/1009). *FeHPO CaHPO*, *4*.
27. Jama-Rodzeńska, A., Chohura, P., Gałka, B., Szuba-Trznadel, A., Falkiewicz, A., & Białkowska, M. (2022). Effect of different doses of phosgreen fertilization on chlorophyll, K, and Ca content in Butterhead lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in peat substrate. *Agriculture*, *12*(6), 788.
28. Jones Jr, J.B., & Case, V.W. (1990). Sampling, handling, and analyzing plant tissue samples. *Soil Testing and Plant Analysis*, *3*, 389-427.
29. Kuo, S., Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., & Loeppert, R.H. (1996). Phosphorus. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Madison. *Soil Sci Soc Am. Inc Am Soc Agron Inc*, 4-9.
30. Li, B., Huang, H.M., Boiarkina, I., Yu, W., Huang, Y.F., Wang, G.Q., & Young, B.R. (2019). Phosphorus recovery through struvite crystallisation: Recent developments in the understanding of operational factors. *Journal of Environmental Management*, *248*, 109254. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.07.025
31. Liang, S., Chen, H., Zeng, X., Li, Z., Yu, W., Xiao, K., & Yang, J. (2019). A comparison between sulfuric acid and oxalic acid leaching with subsequent purification and precipitation for phosphorus recovery from sewage sludge incineration ash. *Water Research*, *159*, 242-251. https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.022
32. Lindsay, W.L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, *42*(3), 421-428.
33. Liu, Y., Chen, J., Mol, A.P., & Ayres, R.U. (2007). Comparative analysis of phosphorus use within national and local economies in China. *Resources, Conservation and Recycling*, *51*(2), 454-474. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.10.012
34. Ma, J., Zhao, D., Tang, X., Yuan, M., Zhang, D., Xu, M., & Jiang, L. (2022). Genome-wide association study on root system architecture and identification of candidate genes in wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(3), 1843. https://doi.org/10.3390/ijms23031843
35. Mancho, C., Diez-Pascual, S., Alonso, J., Gil-Díaz, M., & Lobo, M.C. (2023). Assessment of recovered struvite as a safe and sustainable phosphorous fertilizer. *Environments*, *10*(2), 22. https://doi.org/10.3390/environments10020022
36. Meng, X., Liu, X., Huang, Q., Gao, H., Tay, K., & Yan, J. (2019). Recovery of phosphate as struvite from low-temperature combustion sewage sludge ash (LTCA) by cation exchange. *Waste Management*, *90*, 84-93. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.045
37. Militaru, B.A., Lupa, L., & Pode, R. (2019). Phosphorus recovery as struvite from sewage sludge ash. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, *19*(4.1), 749-755. https://doi.org/10.5593/sgem2019/4.1/S18.095
38. Nongqwenga, N., Muchaonyerwa, P., Hughes, J., Odindo, A., & Bame, I. (2017). Possible use of struvite as an alternative phosphate fertilizer. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *17*(3), 581-593. https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000300003
39. Olsen, S.R. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate* (No. 939). US Department of Agriculture.
40. Page, A.L. (1982). Methods of soil analysis*: chemical and microbiological properties* (Vol. 9). American Society

of Agronomy.
41. Ryu, H.D., Lim, C.S., Kang, M.K., & Lee, S.I. (2012). Evaluation of struvite obtained from semiconductor wastewater as a fertilizer in cultivating Chinese cabbage. *Journal of Hazardous Materials*, *221*, 248-255. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.04.038
42. Seyhan, D. (2009). Country-scale phosphorus balancing as a base for resources conservation. *Resources, Conservation and Recycling*, *53*(12), 698-709. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.05.001
43. Talboys, P.J., Heppell, J., Roose, T., Healey, J.R., Jones, D.L., & Withers, P.J. (2016). Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management? *Plant and Soil*, *401*, 109-123. https://doi.org/10.1007/s11104-015-2747-3
44. Vysotskaya, L., Akhiyarova, G., Feoktistova, A., Akhtyamova, Z., Korobova, A., Ivanov, I., & Kudoyarova, G. (2020). Effects of phosphate shortage on root growth and hormone content of barley depend on capacity of the roots to accumulate ABA. *Plants*, *9*(12), 1722. https://doi.org/10.3390/plants9121722
45. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, *37*(1), 29-38.
46. Wen, G., Huang, L., Zhang, X., & Hu, Z. (2019). Uptake of nutrients and heavy metals in struvite recovered from a mixed wastewater of human urine and municipal sewage by two vegetables in calcareous soil. *Environmental Technology & Innovation*, *15*, 100384. https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100384
47. Xu, H., He, P., Gu, W., Wang, G., & Shao, L. (2012). Recovery of phosphorus as struvite from sewage sludge ash. *Journal of Environmental Sciences*, *24*(8), 1533-1538. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60969-8
48. Yuan, Z., Pratt, S., & Batstone, D.J. (2012). Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes. *Current Opinion in Biotechnology*, *23*(6), 878-883. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2012.08.001.
49. Zin, M.M.T., & Kim, D.J. (2019). Struvite production from food processing wastewater and incinerated sewage sludge ash as an alternative N and P source: Optimization of multiple resources recovery by response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, *126*, 242-249. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.04.018